

ارائه یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح برای شارژ هماهنگ خودروهای برقی در شبکه‌های هوشمند توزیع فشار ضعیف نامتعادل با استفاده از روش شارژ شناور

سعید ذوالفقاری مقدم^۱

۱- استادیار- دانشکده فناوری های صنعتی - گروه مهندسی برق- دانشگاه صنعتی ارومیه- ارومیه- ایران
s.zolfaghari@uut.ac.ie

چکیده: در این مقاله، یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح برای حل مساله شارژ خودروهای برقی با استفاده از روش شارژ شناور ارائه شده است. منظور از شارژ شناور خودروی برقی، امکان تامین توان تکفاز موردنیاز خودروی برقی توسط هر یک از سه فاز یک شین خاص می‌باشد. بعبارت دیگر، بر خلاف بار خانگی معمولی که توان موردنیازش تنها توسط فاز اختصاص یافته به همان بار تامین می‌شود، در روش شارژ شناور امکان تغذیه خودروی برقی از هر یک از سه فاز شین مربوطه وجود دارد. به دلیل اهمیت تلفات در شبکه‌های هوشمند توزیع، این پارامتر بعنوان تابع هدف مدل ارائه شده انتخاب شده است. برای بررسی کارایی مدل پیشنهاد شده، این روش با دو روش شارژ غیرهماهنگ و هماهنگ مقایسه و برای انجام شبیه‌سازی‌ها از شبکه توزیع ۳۱ شینه IEEE بهبود یافته استفاده شده است. مقایسه نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که استفاده از روش ارائه شده، از یک سو باعث کاهش مقدار تلفات شبکه و از سوی دیگر باعث برآورده شدن قید افت ولتاژ به ازای تمام حالت‌های در نظر گرفته شده و نیز بهبود مقدار ولتاژ نول در شبکه می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: روش شارژ شناور، سیستم توزیع فشار ضعیف نامتعادل، هادی نول، خودروی برقی

نوع مقاله: پژوهشی

DOI: 10.52547/jiaeee.19.4.15

تاریخ ارسال مقاله : ۱۴۰۰/۰۸/۲۰

تاریخ پذیرش مشروط مقاله : ۱۴۰۰/۱۲/۱۷

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۴۰۱/۰۲/۱۷

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر سعید ذوالفقاری مقدم

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران - ارومیه - جاده بند - دانشگاه صنعتی ارومیه - دانشکده‌ی فناوری‌های صنعتی - گروه مهندسی برق

فهرست علائم

اندیس‌ها

i, j, k : اندیس‌های مربوط به شین‌های شبکه

ph, PH : اندیس‌های مربوط به هادی‌های فاز

n : اندیس مربوط به هادی نول

t : اندیس مربوط به بازه زمانی

مجموعه‌ها

B : مجموعه تمام شین‌های شبکه

L : مجموعه تمام خطوط شبکه

P : مجموعه تمام فازهای شبکه $\{a, b, c\}$

پارامترها

$CoB_{i,ph}$: ظرفیت باتری خودروی برقی واقع در فاز PH شین i

I_{MAX} : حداکثر جریان قابل قبول برای هادی‌های فاز شبکه

I_{MAX}^n : حداکثر جریان قابل قبول برای هادی‌های نول شبکه

$P_{i,ph,t}^{Res}$: توان اکتیو بار خانگی واقع در فاز ph شین i در بازه زمانی t

$Q_{i,ph,t}^{Res}$: توان راکتیو بار خانگی واقع در فاز ph شین i در بازه زمانی t

$R_{ij,ph}$: مقاومت هادی فاز متصل بین شین‌های i و j

$R_{ij,n}$: مقاومت هادی نول متصل بین شین‌های i و j

$RCTI_{i,PH}$: زمان لازم برای شارژ خودروی برقی واقع در فاز PH شین i

$RoCP$: نرخ شارژ خودروهای برقی

$T_{i,PH}^{Arr}$: زمان ورود خودروی برقی مشترک فاز PH شین i به منزل

$T_{i,PH}^{Dep}$: زمان خروج خودروی برقی مشترک فاز PH شین i از منزل

V_{MIN}, V_{MAX} : حداقل و حداکثر سطوح ولتاژ تکفاز قابل قبول

V_{MAX}^n : حداکثر سطح ولتاژ نول قابل قبول

$X_{ij,ph}$: راکتانس هادی فاز متصل بین شین‌های i و j

$X_{ij,n}$: راکتانس هادی نول متصل بین شین‌های i و j

متغیرها

$I_{ij,ph,t}^{re}$: قسمت حقیقی جریان عبوری از هادی فاز ph متصل بین شین‌های i و j در بازه زمانی t

$I_{ij,ph,t}^{im}$: قسمت موهومی جریان عبوری از هادی فاز ph متصل بین شین‌های i و j در بازه زمانی t

$I_{ij,n,t}^{re}$: قسمت حقیقی جریان عبوری از هادی نول متصل بین شین‌های i و j در بازه زمانی t

$I_{ij,n,t}^{im}$: قسمت موهومی جریان عبوری از هادی نول متصل بین شین‌های i و j در بازه زمانی t

$I_{i,ph,t}^{Gen, re}$: قسمت حقیقی جریان تولیدی فاز ph شین i در بازه زمانی t

$I_{i,ph,t}^{Gen, im}$: قسمت موهومی جریان تولیدی فاز ph شین i در بازه زمانی t

$I_{i,n,t}^{Gen, re}$: قسمت حقیقی جریان تولیدی نول شین i در بازه زمانی t

$I_{i,n,t}^{Gen, im}$: قسمت موهومی جریان تولیدی نول شین i در بازه زمانی t

$I_{i,ph,t}^{Res, re}$: قسمت حقیقی جریان خانگی مصرف شده در هادی فاز

ph شین i در بازه زمانی t

$I_{i,ph,t}^{Res, im}$: قسمت موهومی جریان خانگی مصرف شده در هادی فاز

ph شین i در بازه زمانی t

$I_{i,PH,ph,t}^{Sin gle EV, re}$: قسمت حقیقی جریان خودروی برقی متعلق به مشترک

فاز PH شین i که در بازه زمانی t ، از فاز ph شین i تغذیه می‌شود

$I_{i,PH,ph,t}^{Sin gle EV, im}$: قسمت موهومی جریان خودروی برقی متعلق به مشترک

فاز PH شین i که در بازه زمانی t ، از فاز ph شین i تغذیه می‌شود

$I_{i,ph,t}^{Total EV, re}$: قسمت حقیقی کل جریان دریافت شده از هادی فاز

ph شین i در بازه زمانی t توسط خودروهای برقی

$I_{i,ph,t}^{Total EV, im}$: قسمت موهومی کل جریان دریافت شده از هادی فاز

ph شین i در بازه زمانی t توسط خودروهای برقی

$V_{i,ph,t}^{re}$: قسمت حقیقی ولتاژ فاز ph شین i در بازه زمانی t

$V_{i,ph,t}^{im}$: قسمت موهومی ولتاژ فاز ph شین i در بازه زمانی t

$V_{i,n,t}^{re}$: قسمت حقیقی ولتاژ نول شین i در بازه زمانی t

$V_{i,n,t}^{im}$: قسمت موهومی ولتاژ نول شین i در بازه زمانی t

$V_{i,ph,n,t}^{re}$: قسمت حقیقی اختلاف ولتاژ بین فاز ph و نول در شین i و

در بازه زمانی t

$V_{i,ph,n,t}^{im}$: قسمت موهومی اختلاف ولتاژ بین فاز ph و نول در شین i و

در بازه زمانی t

$P_{i,PH,ph,t}^{Sin gle EV}$: توان اکتیو خودروی برقی متعلق به مشترک

فاز PH شین i که در بازه زمانی t ، از فاز ph شین i تغذیه می‌شود

$u_{i,PH,ph,t}^{Sin gle EV, re}$: متغیر تصمیم‌گیری باینری که نشان می‌دهد آیا خودروی

برقی متعلق به مشترک فاز PH شین i ، در بازه زمانی t ، از

فاز ph شین i تغذیه می‌شود یا خیر (۱ به معنای تغذیه شدن و صفر

به معنای تغذیه نشدن است)

۱- مقدمه

عوامل متعددی مانند: بهبود پارامترهای فنی شبکه قدرت، استفاده هر چه بیشتر از منابع انرژی تجدیدپذیر و افزایش قابلیت اطمینان، باعث تغییر ساختار شبکه‌های قدرت شده است [۱]. شبکه هوشمند توزیع، بعنوان یکی از کلیدی‌ترین مفاهیم این تجدیدساختار، شامل منابع تولید پراکنده، بارهای الکتریکی، تجهیزات اندازه‌گیری و مانیتورینگ و زیرساخت‌های مخابراتی و کنترلی است و امکان تبادل اطلاعات و توان الکتریکی را بین مصرف‌کنندگان و تولیدکنندگان فراهم می‌آورد [۲].

یکی از جدیدترین بارهای کنترل پذیر شبکه‌های هوشمند توزیع، خودروهای برقی هستند که در دهه‌های اخیر با اقبال چشمگیری از سوی سازندگان و مصرف‌کنندگان مواجه شده است [۳]. با اینحال، گسترش روزافزون خودروهای برقی، بسیاری از پارامترهای شبکه مانند منحنی بار، پروفیل ولتاژ و تلفات شبکه را تحت تاثیر خود قرار داده و چالش‌های اساسی برای شرکت‌های توزیع توان ایجاد کرده است [۴]. برای مواجهه صحیح با این چالش، لازم است که از امکانات موجود در

بعبارت بهتر، این مقاله به بررسی دو موضوع مهم می‌پردازد: موضوع اول، بیان اهمیت تاثیر در نظر گرفتن هادی خنثی در محاسبات شبکه‌های توزیع نامتعادل است. در این بخش، نشان داده می‌شود که برای اندازه‌گیری دقیق پارامترهای شبکه، از جمله اندازه ولتاژ و جریان فازهای مختلف و نیز مقدار تلفات لازم است که شبکه بصورت چهارسیمه و با حضور هادی خنثی مدل‌سازی شود. موضوع دوم، ارائه مدل جدیدی برای بهبود روش شارژ خودروهای برقی است. در این مدل، فرض بر آن است که خودروهای برقی فقط قابلیت شارژ از شبکه را داشته و نمی‌توانند توان ذخیره شده در باتری را به شبکه تزریق نمایند. همچنین شارژ خودروها در منزل مالکین خودرو و بصورت تکفاز، در سطح ولتاژ پایین (LV) انجام می‌گیرد. تابع هدف مدل ارائه شده، حداقل سازی تلفات شبکه می‌باشد.

در مدل ارائه شده، بهره‌بردار شبکه، اطلاعات خودروهای مختلف، شامل ظرفیت باتری، مقدار شارژ اولیه و زمان خروج را بعنوان ورودی دریافت کرده و مشخص می‌کند که کدام خودرو در چه زمانی و از طریق کدام فاز شارژ شود. در واقع، خودروی برقی متعلق به مشترک تک فاز واقع در یک شین خاص، قابلیت شارژ شدن از هر یک از سه فاز همان شین را دارد و به همین دلیل از واژه شارژ شناور استفاده شده است. برای بررسی کارایی و نیز قابلیت مقیاس پذیری مدل ارائه شده، از یک شبکه توزیع با تعداد ۴۴۹ شین استفاده شده است. این شبکه از دو سطح ولتاژ متوسط (MV) و ولتاژ پایین (LV) تشکیل شده است، بطوری که ۳۱ شین آن در سطح MV و تعداد ۴۱۸ شین آن در سطح LV قرار دارند.

ساختار اصلی مقاله در ادامه به این صورت است که ابتدا در بخش دوم، اهمیت موضوع در نظر گرفتن سیم نول در مدل‌سازی شبکه‌های هوشمند توزیع فشار ضعیف نامتعادل مورد بررسی قرار گرفته شده است. در بخش سوم، به تشریح مدل ارائه شده برای شارژ شناور خودروهای برقی در شبکه هوشمند توزیع نامتعادل چهارسیمه پرداخته شده و در بخش چهارم، فرمولاسیون این روش ارائه شده است. در بخش پنجم، شبیه‌سازی‌ها و مطالعات موردی بر روی شبکه نمونه انجام شده است. نهایتاً در بخش ششم، خلاصه نتایج مقاله آمده است.

۲- بررسی اهمیت موضوع در نظر گرفتن سیم نول در مدل‌سازی شبکه‌های فشار ضعیف نامتعادل

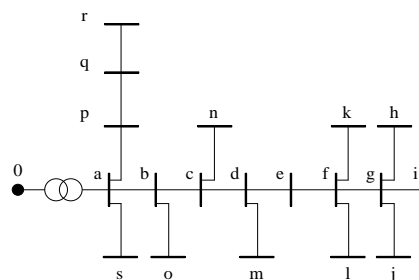
شبکه‌های هوشمند توزیع فشار ضعیف، جزو شبکه‌های سه فاز نامتعادل چهارسیمه محسوب می‌شوند. در حالت بار متعادل، از سیم نول جریان عبور نکرده و مقدار ولتاژ نول در تمام شین‌ها برابر صفر است. اما در حالت بار نامتعادل، جریان عبوری از سیم نول مخالف صفر شده و ولتاژ نول در شین‌های مختلف، با هم متفاوت می‌شود. بنابراین برای مدل‌سازی دقیق شبکه توزیع لازم است که شبکه به صورت چهار سیمه در نظر گرفته شود. برای درک موضوع و مشاهده اثر حضور سیم نول در مدل‌سازی شبکه، از یک شبکه توزیع سه فاز ۱۹ شینه استاندارد

شبکه‌های هوشمند توزیع در جهت شارژ هماهنگ خودروهای برقی استفاده نمود [۵]. در این راستا، روش‌ها و مدل‌های مختلفی ارائه شده است که در ادامه به تشریح برخی از آن‌ها پرداخته می‌شود.

در [۶]، یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح جهت شارژ هماهنگ خودروهای برقی ارائه شده است که در آن به کاهش مقدار بار پیک پرداخته می‌شود. در [۷]، از روش فازی برای شارژ هماهنگ خودروهای برقی استفاده شده است که هدف آن، کاهش هزینه کلی تولید انرژی و نیز تلفات شبکه می‌باشد. مرجع [۸]، از یک روش دینامیکی در جهت تعیین اولویت شارژ خودروهای برقی استفاده می‌کند. در [۹]، مدلی برای شارژ خودروهای برقی ارائه شده است که مبنای آن، استفاده از اندیس‌های ظرفیت حدی و اولویت شارژ می‌باشد. مقاله [۱۰]، از یک روش زمان حقیقی برای در مدار قرار گرفتن و شارژ هماهنگ خودروهای برقی استفاده می‌کند. مرجع [۱۱]، تاثیر حضور خودروهای برقی را بر روی مدیریت تراکم در شبکه‌های توزیع و نیز کاهش میزان آلودگی مورد ارزیابی قرار می‌دهد. مقاله [۱۲] مدلی برای شارژ خودروهای برقی با استفاده از یک روش مبتنی بر بار پاسخگو ارائه داده است. در [۱۳]، یک مساله بهینه‌سازی چندهدفه برای شارژ هماهنگ خودروهای برقی ارائه شده است که هدف آن، حداقل‌سازی هزینه‌های تولید توان و انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌باشد. در [۱۴]، از یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح برای تعیین برنامه زمان‌بندی شارژ خودروهای برقی استفاده شده است. در [۱۵]، یک مدل بهینه‌سازی تصادفی مبتنی بر سناریو جهت حل مساله زمان‌بندی بهینه روز پیش رو در ریزشبکه‌ها در حضور خودروهای برقی ارائه شده است. بعلاوه، در [۱۶-۱۸]، به بررسی جامع خودروهای برقی در شبکه قدرت و روش‌های شارژ آن‌ها پرداخته شده است. در تمام مطالعات انجام شده برای شارژ کنترل شده خودروهای برقی، معمولاً یا شبکه بصورت متعادل در نظر گرفته شده است و یا در صورت نامتعادل بودن، سیم نول در نظر گرفته نشده است [۱۹، ۲۰]. این در حالیست که شارژ خودروهای برقی در منزل، از طریق شبکه توزیع فشار ضعیف انجام می‌شود که ذاتاً یک شبکه چهارسیمه نامتعادل است. بنابراین در نظر گرفتن سیم نول از اهمیت بسزایی برخوردار است [۲۱]. همچنین در تمام مطالعات انجام شده، فرض بر آن است که شارژ خودروی برقی می‌بایست از فازی صورت گیرد که توان خانگی مالک آن خودرو نیز از همان فاز تامین می‌شود. در این مقاله، یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح برای حل مساله شارژ خودروی برقی ارائه شده است که از یک سو، شبکه را بصورت چهارسیمه مدل‌سازی و از سوی دیگر، با ارائه روش شارژ شناور، امکان شارژ خودروهای برقی را از تمام فازها تامین می‌نماید. نوآوری‌های اصلی این مقاله عبارتند از:

- مدل‌سازی شبکه توزیع بصورت چهارسیمه در مساله شارژ هماهنگ خودروهای برقی بمنظور دستیابی به پاسخ‌های واقعی
- ارائه روش شارژ شناور خودروهای برقی جهت حل مساله شارژ هماهنگ خودروهای برقی بمنظور کاهش تلفات شبکه توزیع.

ولتاژ پایین (LV)، مطابق شکل (۱) [۲۲]، برای انجام محاسبات پخش بار در حالت‌های سه سیمه و چهارسیمه استفاده می‌شود.

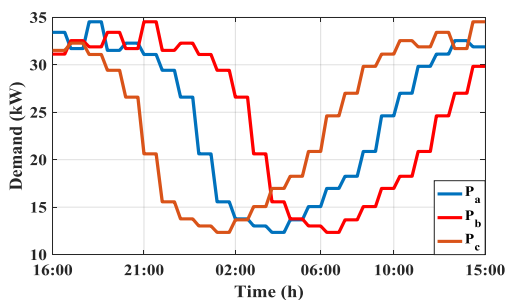


شکل (۱): توپولوژی شبکه هوشمند توزیع سه فاز ۱۹ شینه LV

فرض بر آن است که در هر شین، سه مصرف کننده تکفاز مستقل وجود دارد و شبکه، فاقد مصرف کننده سه فاز است. بنابراین، تعداد کل بارهای تکفاز موجود در شبکه برابر با ۵۷ مشترک است که برای مدل‌سازی منحنی بار شبانه روزی آن‌ها از مشخصه بار ارائه شده در مرجع [۲۲] و برای در نظر گرفتن عدم قطعیت موجود در بار، از روش مونت کارلو [۲۳] استفاده شده است. دو حالت بار متعادل و نامتعادل در نظر گرفته می‌شود. در حالت نامتعادل، مشخصه بار فازهای b و c از شیفیت زمانی بار فاز a به اندازه ۲ ساعت به عقب و جلو بدست می‌آید. شکل (۲) کل توان اکتیو شبکه را در حالت نامتعادل نشان می‌دهد.

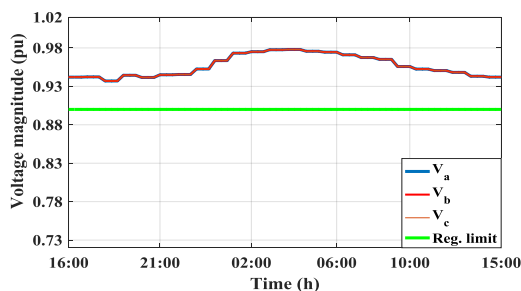
با محاسبات پخش بار پسر-پیشرو [۲۴]، پارامترهای مختلف شبکه در حالت‌های در نظر گرفته شده زیر با یکدیگر مقایسه می‌شوند:

- حالت اول: شبکه سه سیمه با بار متعادل
- حالت دوم: شبکه چهارسیمه با بار متعادل
- حالت سوم: شبکه سه سیمه با بار نامتعادل
- حالت چهارم: شبکه چهارسیمه با بار نامتعادل.

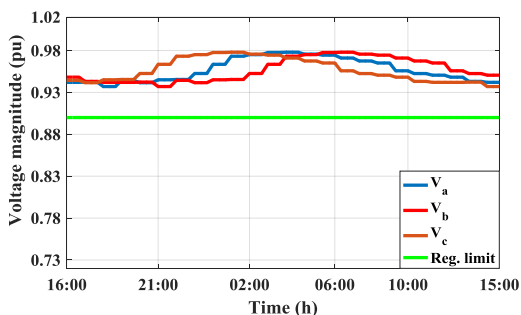


شکل (۲): توان اکتیو شبکه در حالت بار نامتعادل

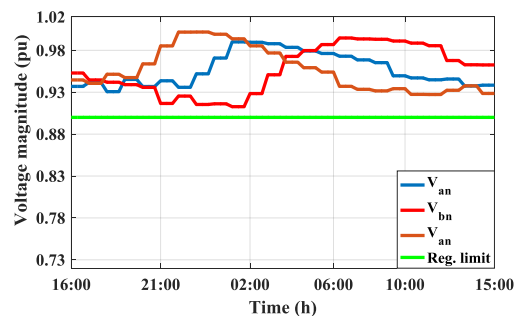
شکل‌های (۳) تا (۵) تغییرات اندازه ولتاژ مربوط به بدترین شین، یعنی شین شماره h را در حالت‌های مختلف نشان می‌دهند.



شکل (۳): تغییرات اندازه ولتاژ شین شماره h در حالت‌های اول و دوم



شکل (۴): تغییرات اندازه ولتاژ شین شماره h در حالت سوم



شکل (۵): تغییرات اندازه ولتاژ شین شماره h در حالت چهارم

- با توجه به مقادیر ولتاژ بدست آمده، نتایج زیر حاصل می‌شود:
- حالت‌های اول و دوم دارای نتایج یکسان هستند. زیرا در بار متعادل، حضور/عدم حضور سیم نول تأثیری بر روی ولتاژ ندارد.
- با استفاده از شبکه سه سیمه، امکان نمایش تأثیر نامتعادلی بار در پارامترهای مختلف شبکه، مانند اندازه ولتاژ، وجود ندارد. زیرا در سیستم سه سیمه، جریان عبوری از سیم نول و در نتیجه افت ولتاژ آن قابل مدل‌سازی نیست و عملاً محاسبات هر یک از فازها بصورت مستقل از هم انجام می‌شود. در شکل (۴)، این موضوع بخوبی نشان داده شده است.
- شکل (۵)، نتایج مربوط به بار نامتعادل را به درستی نشان می‌دهد. همانگونه که انتظار می‌رود و در این شکل نیز مشاهده می‌شود، مقدار افت ولتاژ فاز در حالت نامتعادل بیشتر از حالت متعادل است که دلیل آن، عبور جریان از سیم نول در حالت نامتعادل می‌باشد.

۳- معرفی مفهوم شارژ شناور خودروهای برقی در شبکه هوشمند توزیع و نحوه مدل‌سازی آن

در این مقاله، مفهوم جدیدی تحت عنوان شارژ شناور خودروهای برقی پیشنهاد شده است که در آن، این امکان برای مالک خودروی برقی وجود دارد که خودروی خود را از طریق هر یک از فازهای مربوط به شین خود شارژ نماید. بعنوان مثال، مطابق شکل (۶)، خودروی برقی مربوط به مشترک فاز A شین شماره i شبکه هوشمند توزیع، می‌تواند توان موردنیاز شارژ را از هر یک از فازهای A، B و یا C شین i تامین نماید. این موضوع، بعنوان مهم‌ترین نوآوری این مقاله محسوب می‌شود.

شارژ اولیه و نرخ شارژ، می‌توان مدت زمان لازم برای شارژ هر خودروی برقی را با استفاده از رابطه (۱) بدست آورد:

$$RCTI_{i,PH} = \frac{CoB_{i,PH} \times (1 - ISOC_{i,PH}^{EV})}{RoCP}, \forall i \in B, PH \in P \quad (1)$$

در این رابطه، $CoB_{i,PH}$ بیان کننده ظرفیت باتری، $ISOC_{i,PH}^{EV}$ معرف شارژ اولیه و $RoCP$ نشان دهنده نرخ شارژ است که در این مقاله برابر با 3.5 kW در نظر گرفته شده است. به این ترتیب، مقدار $RCTI_{i,PH}$ که بیان کننده مدت زمان لازم برای شارژ خودروی برقی است، بر حسب ساعت بدست می‌آید. با فرض اینکه هر ساعت به بازه‌های زمانی دلخواه t تقسیم بندی شده باشد، از متغیر تصمیم گیری باینری $u_{i,PH,ph,t}^{Single EV, re}$ استفاده می‌شود تا مشخص شود که آیا خودروی برقی متعلق به مشترک فاز PH شین i ، در بازه زمانی t ، از فاز ph شین i تغذیه شود یا خیر. این موضوع، در رابطه (۲) نشان داده شده است:

$$P_{i,PH,ph,t}^{Single EV} = RoCP u_{i,PH,ph,t}, \forall i \in B, PH \in P, ph \in P, t \in T \quad (2)$$

در رابطه فوق، $P_{i,PH,ph,t}^{Single EV}$ بیان کننده توان اکتیو خودروی برقی متعلق به مشترک فاز PH شین i است که در بازه زمانی t ، از فاز ph شین i تغذیه می‌شود.

با توجه به اینکه مدت زمان کل شارژ نباید از $RCTI_{i,PH}$ بیشتر شود، از رابطه (۳) برای در نظر گرفتن این محدودیت استفاده می‌شود:

$$\sum_{t \in T} \sum_{ph \in P} u_{i,PH,ph,t} = RCTI_{i,PH}, \forall i \in B, PH \in P \quad (3)$$

نکته حائز اهمیت آن است که در هر بازه زمانی t ، هر خودرو فقط باید از یک فاز تغذیه شود که این قید با استفاده از رابطه (۴) برآورده می‌شود:

$$\sum_{ph \in P} u_{i,PH,ph,t} = 1, \forall i \in B, PH \in P \quad (4)$$

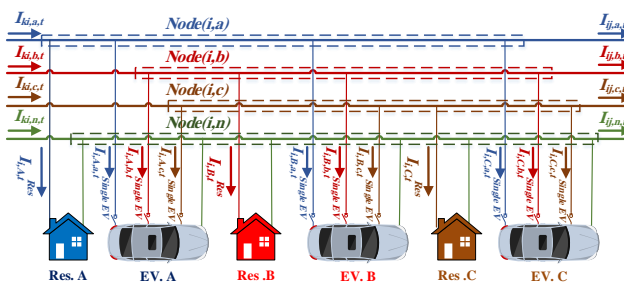
همچنین باید توجه داشت که شارژ خودروهای برقی در فاصله زمانی حضور در منزل انجام می‌گیرد و مقدار متغیر باینری در بازه‌های دیگر بایستی برابر با صفر فرض شود که این قید نیز با استفاده از رابطه (۵) تامین می‌شود:

$$u_{i,PH,ph,t} = 0, \forall i \in B, PH \in P, ph \in P, t < T_{i,PH}^{Arr}, t > T_{i,PH}^{Dep} \quad (5)$$

نهایتاً برای مدل‌سازی ارتباط توان اکتیو و راکتیو خودروهای برقی بر حسب متغیرهای جریان و ولتاژ شین‌ها، می‌توان از روابط (۶) و (۷) استفاده نمود:

$$P_{i,PH,ph,t}^{Single EV} = V_{i,ph,n,t}^{re} I_{i,PH,ph,t}^{Single EV, re} + V_{i,ph,n,t}^{im} I_{i,ph,t}^{Single EV, im}, \forall i \in B, PH \in P, ph \in P, t \in T \quad (6)$$

زیرا در تحقیقات موجود، معمولاً خودروی برقی متعلق به مشترک یک فاز مشخص، تنها می‌تواند از همان فاز تغذیه شود و امکان شارژ آن از فازهای دیگر وجود ندارد.



شکل (۶): شارژ شناور خودروهای برقی در شبکه هوشمند توزیع

برای پیاده‌سازی این مفهوم، لازم است که جریان بار خانگی هر فاز، متفاوت از جریان شارژ خودروی برقی همان فاز در نظر گرفته شود. زیرا جریان بار خانگی یک فاز خاص مانند A همواره از فاز A تامین می‌شود. اما جریان لازم برای شارژ خودروی برقی متعلق به مشترک فاز A، در روش شارژ شناور می‌تواند از هر سه فاز تامین شود. بهمین دلیل، برای نمایش جریان‌های بار خانگی مشترکین موجود در فازهای A، B و C شین i ، بترتیب از متغیرهای $I_{i,A,t}^{Res}$ ، $I_{i,B,t}^{Res}$ و $I_{i,C,t}^{Res}$ استفاده شده است که در بازه زمانی t ، تنها از طریق فاز مربوط به خودشان تامین می‌شوند. اما برای نمایش جریان تامین کننده خودروی برقی مشترک موجود در فاز A شین i ، از سه متغیر $I_{i,A,t}^{Single EV}$ ، $I_{i,A,b,t}^{Single EV}$ و $I_{i,A,c,t}^{Single EV}$ استفاده شده است که به ترتیب بیان کننده جریان شارژ خودروی برقی مشترک موجود در فاز A شین i از فازهای A، B و یا C در بازه زمانی t می‌باشند. بطور مشابه، متغیرهای $I_{i,B,t}^{Single EV}$ ، $I_{i,B,a,t}^{Single EV}$ و $I_{i,B,c,t}^{Single EV}$ جریان‌های تامین کننده خودروی برقی مشترک موجود در فاز B شین i و متغیرهای $I_{i,C,t}^{Single EV}$ ، $I_{i,C,a,t}^{Single EV}$ و $I_{i,C,b,t}^{Single EV}$ جریان‌های تامین کننده خودروی برقی مشترک موجود در فاز C شین i را نشان می‌دهند.

لازم به ذکر است که در مدل ارائه شده در این مقاله، خودروهای برقی تنها قابلیت شارژ شدن از شبکه را داشته و انتقال توان از خودرو به شبکه (V2G) در نظر گرفته نشده است. همچنین، هر خودروی برقی دارای پارامترهای مهم شامل: ظرفیت باتری، میزان شارژ اولیه، زمان ورود به منزل و زمان خروج از منزل است که برای مدل‌سازی آن‌ها از روش ارائه شده در [۲۵]، استفاده شده است. اطلاعات مذکور به همراه سایر اطلاعات شبکه، شامل توپولوژی سیستم و منحنی‌های بار خانگی مربوط به مشترکین تکفاز، بعنوان ورودی در اختیار بهره‌بردار شبکه قرار می‌گیرد و نهایتاً مشخص می‌شود که کدام خودرو در چه زمانی و از طریق کدام فاز بایستی شارژ شود. باید توجه داشت که نرخ شارژ خودروهای برقی در این مقاله، برابر با مقدار ثابت 3.5 kW فرض شده است که معادل مصرف جریان 16 A در ولتاژ 220 V می‌باشد. با در اختیار داشتن اطلاعات مربوط به ظرفیت باتری خودرو،

$$\sum_{ph \in P} I_{ij,ph,t}^{im} + I_{ij,n,t}^{im} = 0, \forall ij \in L, t \in T \quad (9)$$

$$\sum_{ph \in P} I_{i,ph,t}^{Gen,re} + I_{i,n,t}^{Gen,re} = 0, \forall i \in B, t \in T \quad (10)$$

$$\sum_{ph \in P} I_{i,ph,t}^{Gen,im} + I_{i,n,t}^{Gen,im} = 0, \forall i \in B, t \in T \quad (11)$$

$$I_{i,ph,t}^{Gen,re} = 0, \forall i > 1, ph \in P, t \in T \quad (12)$$

$$I_{i,ph,t}^{Gen,im} = 0, \forall i > 1, ph \in P, t \in T \quad (13)$$

$$V_{i,ph,t}^{re} - V_{j,ph,t}^{re} = R_{ij,ph} I_{ij,ph,t}^{re} - X_{ij,ph} I_{ij,ph,t}^{im}, \forall ij \in L, ph \in P, t \in T \quad (14)$$

$$V_{i,ph,t}^{im} - V_{j,ph,t}^{im} = R_{ij,ph} I_{ij,ph,t}^{im} + X_{ij,ph} I_{ij,ph,t}^{re}, \forall ij \in L, ph \in P, t \in T \quad (15)$$

$$V_{i,n,t}^{re} - V_{j,n,t}^{re} = R_{ij,n} I_{ij,n,t}^{re} - X_{ij,n} I_{ij,n,t}^{im}, \forall ij \in L, t \in T \quad (16)$$

$$V_{i,n,t}^{im} - V_{j,n,t}^{im} = R_{ij,n} I_{ij,n,t}^{im} + X_{ij,n} I_{ij,n,t}^{re}, \forall ij \in L, t \in T \quad (17)$$

$$P_{i,ph,t}^{Res} = V_{i,ph,n,t}^{re} I_{i,ph,t}^{Res,re} + V_{i,ph,n,t}^{im} I_{i,ph,t}^{Res,im}, \forall i \in B, ph \in P, t \in T \quad (18)$$

$$Q_{i,ph,t}^{Res} = -V_{i,ph,n,t}^{re} I_{i,ph,t}^{Res,im} + V_{i,ph,n,t}^{im} I_{i,ph,t}^{Res,re}, \forall i \in B, ph \in P, t \in T \quad (19)$$

$$P_{i,PH,ph,t}^{Single EV} = V_{i,ph,n,t}^{re} I_{i,PH,ph,t}^{Single EV,re} + V_{i,ph,n,t}^{im} I_{i,ph,t}^{Single EV,im}, \forall i \in B, PH \in P, ph \in P, t \in T \quad (20)$$

$$0 = -V_{i,ph,n,t}^{re} I_{i,PH,ph,t}^{Single EV,im} + V_{i,ph,n,t}^{im} I_{i,ph,t}^{Single EV,re}, \forall i \in B, PH \in P, ph \in P, t \in T \quad (21)$$

$$P_{i,PH,ph,t}^{Single EV} = RoCP u_{i,PH,ph,t}, \forall i \in B, PH \in P, ph \in P, t \in T \quad (22)$$

$$V_{i,ph,n,t}^{re} = V_{i,ph,t}^{re} - V_{i,n,t}^{re}, \forall i \in B, ph \in P, t \in T \quad (23)$$

$$V_{i,ph,n,t}^{im} = V_{i,ph,t}^{im} - V_{i,n,t}^{im}, \forall i \in B, ph \in P, t \in T \quad (24)$$

$$\sum_{i \in T} \sum_{ph \in P} u_{i,PH,ph,t} = RCTI_{i,PH}, \forall i \in B, PH \in P \quad (25)$$

$$RCTI_{i,PH} = \frac{CoB_{i,PH} \times (1 - ISOC_{i,PH}^{EV})}{RoCP}, \forall i \in B, PH \in P \quad (26)$$

$$\sum_{ph \in P} u_{i,PH,ph,t} = 1, \forall i \in B, PH \in P \quad (27)$$

$$V_{MIN}^2 \leq (V_{i,ph,n,t}^{re})^2 + (V_{i,ph,n,t}^{im})^2 \leq V_{MAX}^2, \forall i \in B, ph \in P, t \in T \quad (28)$$

$$0 \leq (V_{i,n,t}^{re})^2 + (V_{i,n,t}^{im})^2 \leq (V_{MAX}^n)^2, \forall i \in B, t \in T \quad (29)$$

$$0 = -V_{i,ph,n,t}^{re} I_{i,PH,ph,t}^{Single EV,im} + V_{i,ph,n,t}^{im} I_{i,ph,t}^{Single EV,re}, \forall i \in B, PH \in P, ph \in P, t \in T \quad (7)$$

سمت چپ رابطه (7) بیان کننده توان راکتیو خودروی برقی است

که مقدار آن برابر با صفر در نظر گرفته شده است.

قیود نشان داده در (1) تا (7) و سایر قیود شبکه به همراه تابع

هدف در نظر گرفته، مدل کلی ارائه شده برای شارژ شناور خودروهای برقی را بیان می‌کند که در بخش بعد به تشریح آن پرداخته می‌شود.

4- فرمولاسیون مدل ارائه شده

در بخش دوم مشاهده شد که برای مدلسازی دقیق شبکه توزیع نامتعادل، بایستی هادی نول نیز در نظر گرفته شود. این موضوع، در حضور خودروهای برقی که بصورت تکفاز و در سطح LV شارژ می‌شوند، اهمیت دوچندان می‌یابد. زیرا شارژ تصادفی خودروها، می‌تواند میزان نامتعادلی شبکه را افزایش دهد. در بخش سوم نیز مفهوم شارژ شناور و نحوه مدلسازی آن توضیح داده شده است.

در این بخش، نحوه مدلسازی شارژ شناور خودروهای برقی در شبکه توزیع چهارسیمه بصورت یک مساله بهینه‌سازی ارائه می‌شود که تابع هدف آن مطابق با رابطه (1) و قیود آن بصورت روابط (2) تا (32) در نظر گرفته شده است:

$$Min \left\{ \sum_{t \in T} \sum_{ph \in P} \sum_{ij \in L} R_{ij,ph} \cdot \left[(I_{ij,ph,t}^{re})^2 + (I_{ij,ph,t}^{im})^2 \right] + \sum_{t \in T} \sum_{ij \in L} R_{ij,n} \cdot \left[(I_{ij,n,t}^{re})^2 + (I_{ij,n,t}^{im})^2 \right] \right\} \quad (1)$$

با در نظر گرفتن قیود زیر:

$$\sum_{ki \in L} I_{ki,ph,t}^{re} - \sum_{ij \in L} I_{ij,ph,t}^{re} + I_{i,ph,t}^{Gen,re} = I_{i,ph,t}^{Res,re} + I_{i,ph,t}^{Total EV,re}, \forall i \in B, ph \in P, t \in T \quad (2)$$

$$\sum_{ki \in L} I_{ki,ph,t}^{im} - \sum_{ij \in L} I_{ij,ph,t}^{im} + I_{i,ph,t}^{Gen,im} = I_{i,ph,t}^{Res,im} + I_{i,ph,t}^{Total EV,im}, \forall i \in B, ph \in P, t \in T \quad (3)$$

$$\sum_{ki \in L} I_{ki,n,t}^{re} - \sum_{ij \in L} I_{ij,n,t}^{re} + I_{i,n,t}^{Gen,re} + \sum_{ph \in P} (I_{i,ph,t}^{Res,re} + I_{i,ph,t}^{Total EV,re}) = 0, \forall i \in B, t \in T \quad (4)$$

$$\sum_{ki \in L} I_{ki,n,t}^{im} - \sum_{ij \in L} I_{ij,n,t}^{im} + I_{i,n,t}^{Gen,im} + \sum_{ph \in P} (I_{i,ph,t}^{Res,im} + I_{i,ph,t}^{Total EV,im}) = 0, \forall i \in B, t \in T \quad (5)$$

$$I_{i,ph,t}^{Total EV,re} = \sum_{PH \in P} I_{i,PH,ph,t}^{Single EV,re}, \forall i \in B, ph \in P, t \in T \quad (6)$$

$$I_{i,ph,t}^{Total EV,im} = \sum_{PH \in P} I_{i,PH,ph,t}^{Single EV,im}, \forall i \in B, ph \in P, t \in T \quad (7)$$

$$\sum_{ph \in P} I_{ij,ph,t}^{re} + I_{ij,n,t}^{re} = 0, \forall ij \in L, t \in T \quad (8)$$

۴-۱- خطی سازی مدل ارائه شده

با توجه به غیرخطی بودن معادلات (۱)، (۱۸) تا (۲۱) و (۲۸) تا (۳۱)، مدل ارائه شده، یک مساله بهینه‌سازی غیرخطی عدد صحیح محسوب می‌شود. برای خطی سازی معادلات (۱۸) و (۱۹)، از معادلات (۳۳) تا (۳۶) استفاده می‌شود [۲۶]:

$$I_{i,ph,t}^{Res, re} = g = \frac{P_{i,ph,t}^{Res} V_{i,phn,t}^{re} + Q_{i,ph,t}^{Res} V_{i,phn,t}^{im}}{V_{i,phn,t}^{re,2} + V_{i,phn,t}^{im,2}} \quad (33)$$

$$I_{i,ph,t}^{Res, im} = h = \frac{P_{i,ph,t}^{Res} V_{i,phn,t}^{im} - Q_{i,ph,t}^{Res} V_{i,phn,t}^{re}}{V_{i,phn,t}^{re,2} + V_{i,phn,t}^{im,2}} \quad (34)$$

$$I_{i,ph,t}^{Res, re} = g^* + \frac{\partial g}{\partial V_{i,phn,t}^{re}} \left(V_{i,phn,t}^{re} - V_{i,phn,t}^{re,*} \right) + \frac{\partial g}{\partial V_{i,phn,t}^{im}} \left(V_{i,phn,t}^{im} - V_{i,phn,t}^{im,*} \right) \quad (35)$$

$$I_{i,ph,t}^{Res, im} = h^* + \frac{\partial h}{\partial V_{i,phn,t}^{re}} \left(V_{i,phn,t}^{re} - V_{i,phn,t}^{re,*} \right) + \frac{\partial h}{\partial V_{i,phn,t}^{im}} \left(V_{i,phn,t}^{im} - V_{i,phn,t}^{im,*} \right) \quad (36)$$

خطی سازی معادلات (۲۰) و (۲۱)، با استفاده از معادلات (۳۷) و (۳۸) انجام می‌گیرد [۲۶]:

$$P_{i,PH,ph,t}^{Sin gle EV} = V_{i,ph,n,t}^{re,*} I_{i,PH,ph,t}^{Sin gle EV, re} + V_{i,ph,n,t}^{im,*} I_{i,ph,t}^{Sin gle EV, im} \quad (37)$$

$$0 = -V_{i,ph,n,t}^{re,*} I_{i,PH,ph,t}^{Sin gle EV, im} + V_{i,ph,n,t}^{im,*} I_{i,ph,t}^{Sin gle EV, re} \quad (38)$$

برای خطی سازی معادلات (۲۸) و (۲۹)، از معادلات (۳۹) تا (۴۳) استفاده می‌شود [۱۹]:

$$V_{i,phn,t}^{im} \leq \frac{\sin \bar{\theta} - \sin \bar{\theta}}{\cos \bar{\theta} - \cos \bar{\theta}} \left(V_{i,phn,t}^{re} - \bar{V} \cos \bar{\theta} \right) + \bar{V} \sin \bar{\theta} \quad (39)$$

$$V_{i,phn,t}^{im} \leq \frac{-\sin \bar{\theta}}{\cos \bar{\theta} - 1} \left(V_{i,phn,t}^{re} - \bar{V} \right) \quad (40)$$

$$V_{i,phn,t}^{im} \leq \frac{-\sin \bar{\theta}}{\cos \bar{\theta} - 1} \left(V_{i,phn,t}^{re} - \bar{V} \right) \quad (41)$$

$$V_{i,phn,t}^{im} \leq V_{i,phn,t}^{re} \tan \bar{\theta} \quad (42)$$

$$V_{i,phn,t}^{im} \geq V_{i,phn,t}^{re} \tan \bar{\theta} \quad (43)$$

خطی سازی معادلات (۳۰) و (۳۱)، با استفاده از معادلات (۴۴) تا (۴۷) انجام می‌گیرد [۱۹]:

$$I_{ij,ph,t}^{re} = I_{ij,ph,t}^{re+} - I_{ij,ph,t}^{re-} \quad (44)$$

$$I_{ij,ph,t}^{im} = I_{ij,ph,t}^{im+} - I_{ij,ph,t}^{im-} \quad (45)$$

$$I_{ij,n,t}^{re} = I_{ij,n,t}^{re+} - I_{ij,n,t}^{re-} \quad (46)$$

$$I_{ij,n,t}^{im} = I_{ij,n,t}^{im+} - I_{ij,n,t}^{im-} \quad (47)$$

$$0 \leq \left(I_{ij,ph,t}^{re} \right)^2 + \left(I_{ij,ph,t}^{im} \right)^2 \leq \left(I_{MAX} \right)^2, \forall ij \in L, ph \in P, t \in T \quad (30)$$

$$0 \leq \left(I_{ij,n,t}^{re} \right)^2 + \left(I_{ij,n,t}^{im} \right)^2 \leq \left(I_{MAX}^n \right)^2, \forall ij \in L, t \in T \quad (31)$$

$$u_{i,PH,ph,t} = 0, \forall i \in B, PH \in P, ph \in P, t < T_{i,PH}^{Arr}, t > T_{i,PH}^{Dep} \quad (32)$$

طبق معادله (۱)، حداقل‌سازی کل انرژی تلف شده در هادی‌های فاز و نول شبکه بعنوان تابع هدف در نظر گرفته شده است. معادلات (۲) تا (۵)، قانون جریان کیرشلف را در فاز ph و نول مربوط به گره i ، در بازه زمانی t نشان می‌دهند. قیود (۶) و (۷) مشخص می‌کنند که کل جریان دریافت شده توسط خودروهای برقی از هادی فاز ph شین i در بازه زمانی t ، برابر است با مجموع جریان‌های خودروهای برقی متعلق به مالکین هر سه فاز واقع در همان شین که ممکن است از فاز مذکور تغذیه شوند. معادلات (۸) و (۹)، قانون جریان کیرشلف را در خطوط شبکه توزیع نشان می‌دهند. معادلات (۱۰) و (۱۱)، نشان‌دهنده قانون جریان کیرشلف در هادی‌های منبع تولید توان مستقر در شین i و در بازه زمانی t می‌باشند. معادلات (۱۲) و (۱۳) نشان می‌دهند که شبکه بصورت شعاعی و از یک سو تغذیه شده در نظر گرفته شده است. معادلات (۱۴) تا (۱۷)، برترتیب قیود مربوط به قانون ولتاژ کیرشلف را در هادی‌های فاز و نول متصل بین دو گره مجاور نشان می‌دهند. روابط (۱۸) تا (۲۱)، بیان‌کننده توان اکتیو و راکتیو مصرفی توسط بارهای خانگی و خودروهای برقی می‌باشند. باید توجه داشت که خودروهای برقی فقط توان اکتیو مصرف می‌کنند و به همین دلیل، سمت چپ معادله (۲۱)، که بیان‌کننده توان راکتیو خودروی برقی است، برابر با صفر می‌باشد. در معادله (۲۲)، متغیر باینری $u_{i,PH,ph,t}^{Sin gle EV, re}$ مشخص‌کننده شارژ/عدم شارژ خودروی برقی متعلق به مشترک فاز PH شین i ، در بازه زمانی t ، از فاز ph شین i می‌باشد. معادلات (۲۳) و (۲۴)، نشان‌دهنده ارتباط بین متغیر اختلاف ولتاژ با ولتاژهای فاز و نول است. معادله (۲۵)، مشخص می‌کند که مجموع زمان‌های شارژ هر خودروی برقی محدود بوده و توسط پارامتر $RCTI_{i,PH}$ مشخص می‌شود که مقدار آن با استفاده از معادله (۲۶) و بر اساس ظرفیت باتری، شارژ اولیه خودرو و نرخ شارژ خودروهای برقی محاسبه می‌شود. معادله (۲۷)، قید محدودکننده تغذیه هر خودروی برقی واقع در شین i و در بازه زمانی t را نشان می‌دهد که قادر است تنها توسط یکی از فازهای همان شین تغذیه شود. معادله (۲۸) قید مربوط به حداقل و حداکثر مقدار مجاز ولتاژ تکفاز و معادله (۲۹) قید مربوط به حداکثر مقدار مجاز ولتاژ نول را نشان می‌دهند. بطور مشابه، حداکثر جریان مجاز قابل عبور از هادی‌های فاز و نول شبکه توسط معادلات (۳۰) و (۳۱) محدود می‌شوند. معادله (۳۲) نشان می‌دهد که هر خودروی برقی تنها در بازه زمانی بین زمان ورود به منزل و زمان خروج از آن می‌تواند شارژ شود.

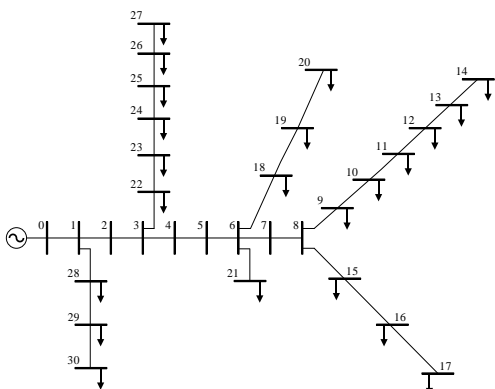
(۲) تا (۱۷)، (۲۲) تا (۲۹)، (۳۲)، (۳۳) تا (۶۷).

مدل بهینه‌سازی خطی ارائه شده، در مقایسه با مدل غیرخطی بسیار قدرتمندتر بوده و برای حل آن می‌توان از نرم‌افزارهای موجود استفاده کرد [۲۶].

۵- انجام شبیه‌سازی و تحلیل نتایج

۵-۱- معرفی شبکه مورد مطالعه

برای انجام شبیه‌سازی‌ها، از شبکه توزیع ۳۱ شینه IEEE بهیود یافته ولتاژ متوسط (MV)، مطابق شکل (۷)، استفاده شده است [۲۲] که خود شامل فیدرهای LV در شین‌های شماره ۹ تا ۳۰ می‌باشد. هر یک از این فیدرها، نشاندهنده یک شبکه LV مشابه با شکل ۱ است که توسط یک ترانس توزیع، تغذیه می‌شود. بنابراین تعداد کل شین‌های شبکه برابر با ۴۴۹ شین است که تعداد ۳۱ شین آن در سطح MV و تعداد ۴۱۸ شین آن در سطح LV قرار دارند. لازم به ذکر است که با توجه به اینکه هر فیدر، شامل ۵۷ مشترک تکفاز است، تعداد کل بارهای تکفاز شبکه برابر با ۱۲۵۴ مشترک در سطح LV می‌باشد و هیچگونه بار سه فازی در شبکه در نظر گرفته نشده است. علت انتخاب شبکه فوق‌الذکر که بصورت ترکیب سطوح MV و LV است، بررسی قابلیت مقیاس پذیری مدل ارائه شده می‌باشد. برای مدل‌سازی بارهای خانگی تکفاز از روش ارائه شده در بخش ۲ استفاده شده است که در آن شبکه بصورت نامتعادل فرض می‌شود؛ برای مثال، منحنی بار کل فیدر شماره ۹ مطابق با شکل (۲) در نظر گرفته شده است.



شکل (۷): توپولوژی شبکه هوشمند توزیع ۳۱ شینه IEEE

برای اختصاص خودروهای برقی به مشترکین شبکه، دو سطح مختلف بعنوان درصد نفوذ خودروهای برقی در شبکه هوشمند توزیع در نظر گرفته شده است که عبارتند از: ۴۰٪ و ۶۰٪. منظور از درصد نفوذ، عبارتست از نسبت تعداد مشترکین مالک خودروی برقی به تعداد کل مشترکین شبکه. تعداد مالکین خودروی برقی در تمام فیدرها با هم برابر فرض شده است. بعنوان مثال، با فرض اینکه درصد نفوذ خودروهای برقی برابر با ۴۰٪ باشد، تعداد مالکین خودروی برقی در هر فیدر برابر با ۲۳ مشترک از ۵۷ مشترک است که بصورت تصادفی انتخاب می‌شوند. همچنین فرض بر آن است که ۱۰٪ از خودروهای

$$I_{ij,ph,t}^{sqr} = \sum_{r=1}^{R_{re}} m_{ij,ph,r}^{re} \Delta_{ij,ph,t,r}^{re} + \sum_{r=1}^{R_{im}} m_{ij,ph,r}^{im} \Delta_{ij,ph,t,r}^{im} \quad (48)$$

$$I_{ij,n,t}^{sqr} = \sum_{r=1}^{R_{re}} m_{ij,n,t}^{re} \Delta_{ij,n,t,r}^{re} + \sum_{r=1}^{R_{im}} m_{ij,n,t}^{im} \Delta_{ij,n,t,r}^{im} \quad (49)$$

$$I_{ij,ph,t}^{re+} + I_{ij,ph,t}^{re-} = \sum_{r=1}^{R_{re}} \Delta_{ij,ph,t,r}^{re} \quad (50)$$

$$I_{ij,ph,t}^{im+} + I_{ij,ph,t}^{im-} = \sum_{r=1}^{R_{im}} \Delta_{ij,ph,t,r}^{im} \quad (51)$$

$$0 \leq \Delta_{ij,ph,t,r}^{re} \leq \bar{\Delta}_{ij,ph}^{re} \quad ; \quad r = 1, 2, \dots, R_{re} \quad (52)$$

$$0 \leq \Delta_{ij,ph,t,r}^{im} \leq \bar{\Delta}_{ij,ph}^{im} \quad ; \quad r = 1, 2, \dots, R_{im} \quad (53)$$

$$m_{ij,ph,r}^{re} = (2r-1) \bar{\Delta}_{ij,ph}^{re} \quad ; \quad r = 1, 2, \dots, R_{re} \quad (54)$$

$$\bar{\Delta}_{ij,ph}^{re} = \frac{\bar{I}_{ij,ph}}{R_{re}} \quad (55)$$

$$m_{ij,ph,r}^{im} = (2r-1) \bar{\Delta}_{ij,ph}^{im} \quad ; \quad r = 1, 2, \dots, R_{im} \quad (56)$$

$$\bar{\Delta}_{ij,ph}^{im} = \frac{\bar{I}_{ij,ph}}{R_{re}} K_{im} \quad (57)$$

$$I_{ij,n,t}^{re+} + I_{ij,n,t}^{re-} = \sum_{r=1}^{R_{re}} \Delta_{ij,n,t,r}^{re} \quad (58)$$

$$I_{ij,n,t}^{im+} + I_{ij,n,t}^{im-} = \sum_{r=1}^{R_{im}} \Delta_{ij,n,t,r}^{im} \quad (59)$$

$$0 \leq \Delta_{ij,n,t,r}^{re} \leq \bar{\Delta}_{ij,n}^{re} \quad ; \quad r = 1, 2, \dots, R_{re} \quad (60)$$

$$0 \leq \Delta_{ij,n,t,r}^{im} \leq \bar{\Delta}_{ij,n}^{im} \quad ; \quad r = 1, 2, \dots, R_{im} \quad (61)$$

$$m_{ij,n,t,r}^{re} = (2r-1) \bar{\Delta}_{ij,n}^{re} \quad ; \quad r = 1, 2, \dots, R_{re} \quad (62)$$

$$\bar{\Delta}_{ij,n}^{re} = \frac{\bar{I}_{ij,n}}{R_{re}} \quad (63)$$

$$m_{ij,n,t,r}^{im} = (2r-1) \bar{\Delta}_{ij,n}^{im} \quad ; \quad r = 1, 2, \dots, R_{im} \quad (64)$$

$$\bar{\Delta}_{ij,n}^{im} = \frac{\bar{I}_{ij,n}}{R_{re}} K_{im} \quad (65)$$

$$0 \leq I_{ij,ph,t}^{sqr} \leq \bar{I}_{ij,ph}^2 \quad (66)$$

$$0 \leq I_{ij,n,t}^{sqr} \leq \bar{I}_{ij,n}^2 \quad (67)$$

۴-۲- مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح

مساله بهینه‌سازی خطی عدد صحیح برای شارژ خودروهای برقی با قابلیت شارژ شناور بصورت زیر بیان می‌شود:

$$\text{Min} \left\{ \sum_{t \in T} \sum_{ph \in P} \sum_{ij \in L} R_{ij,ph} I_{ij,ph,t}^{sqr} + \sum_{t \in T} \sum_{ij \in L} R_{ij,n} I_{ij,n,t}^{sqr} \right\} \quad (68)$$

با در نظر گرفتن قیود زیر:

۵۶	۱۱:۳۰	۱۷:۰۰	۲۰	9-i-B
۳۴	۰۷:۴۵	۲۰:۳۰	۲۶	9-j-B
۲۳	۰۸:۰۰	۲۰:۴۵	۱۴	9-k-A
۳۲	۰۶:۳۰	۱۹:۳۰	۸	9-l-A
۶۰	۰۶:۱۵	۱۷:۱۵	۹	9-l-C
۴۱	۰۷:۰۰	۱۹:۱۵	۱۶	9-m-C
۵۳	۰۸:۰۰	۲۳:۰۰	۲۹	9-n-C
۶۰	۰۵:۳۰	۲۰:۴۵	۱۸	9-o-B
۳۵	۰۶:۰۰	۲۰:۱۵	۹	9-p-C
۴۲	۰۵:۴۵	۱۶:۴۵	۱۵	9-q-B
۶۵	۰۶:۳۰	۱۶:۳۰	۱۶	9-r-A
۵۶	۰۹:۰۰	۲۱:۴۵	۲۰	9-s-C

برقی، دارای اولویت شارژ هستند؛ به این معنی که به محض ورود به منزل بایستی شارژ شوند. برای در نظر گرفتن عدم قطعیت پارامترهای نایقین خودروهای برقی از روش مونت کارلو و توابع توزیع احتمال مناسب نشان داده شده در جدول ۱ استفاده شده است [۲۵]. برای مشخص شدن موضوع، محل قرارگیری خودروهای برقی فیدر ۹ و نیز پارامترهای مختلف مربوط به آن‌ها در حالت نفوذ ۴۰٪، در جدول ۲ نشان داده شده است. بعنوان مثال، در شین a از فیدر شماره ۹، دو خودروی برقی در فازهای A و B وجود دارد که هر یک، متعلق به مشترک تکفاز مربوطه است. خودروی برقی واقع در فاز A شین a فیدر ۹، یا همان A-a-9، دارای باتری با ظرفیت 26 kWh می‌باشد.

برای انجام شبیه‌سازی، از کامپیوتر با مشخصات Core™ i7 2.2 با حافظه 8 GB و نرم افزار GAMS و برای محاسبه عددی، از برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح و حل کننده CPLEX استفاده شده است. مطالعات برای یک شبانه‌روز انجام گرفته و بازه‌های زمانی، بصورت ۲۰ دقیقه در نظر گرفته شده است.

۵-۲- نتایج شبیه سازی و بحث و بررسی

شکل‌های (۸) و (۹)، بازه‌های زمانی شارژ خودروهای برقی موجود در فیدر شماره ۹ شبکه مورد مطالعه را بعنوان نمونه نشان می‌دهد. در شکل (۸)، خودروهای برقی بصورت هماهنگ و بدون قابلیت شارژ شناور (همان روش دوم) تغذیه می‌شوند. حال آنکه شکل (۹)، نتایج مربوط به شارژ شناور خودروهای برقی (روش سوم) را نشان می‌دهد.

با دقت در نتایج بدست آمده، دو موضوع مهم قابل بیان است:

- قبلاً گفته شد در روش شارژ شناور، هر خودروی برقی موجود در هر شین می‌تواند از هر یک از فازهای همان شین تغذیه شود. برای مثال، با توجه به شکل (۹) خودروی A-a-9 در بازه زمانی ۱۸:۰۰ الی ۱۸:۲۰، ۱۹:۴۰ الی ۲۰:۰۰، ۲۱:۲۰ الی ۲۲:۰۰، ۲۲:۲۰ الی ۲۲:۴۰ از فاز C و در بازه زمانی ۲۳:۰۰ الی ۲۳:۴۰ از فاز A تغذیه می‌شود. حال آنکه در روش هماهنگ بدون قابلیت شارژ شناور، هر خودرو تنها می‌تواند از فاز متعلق به آن شارژ شود. برای مثال، با توجه به شکل (۸)، خودروی A-a-9 در بازه ۱۷:۰۰ الی ۱۹:۰۰ از فاز A شارژ می‌شود.

با مقایسه نتایج شکل (۹) با منحنی بار فیدر شماره ۹ که در شکل (۲) نشان داده شده است، ملاحظه می‌شود که در روش شناور، شارژ خودروهای برقی در زمان‌های کم باری هر یک از فازها انجام می‌شود. این موضوعی است که در صورت عدم وجود قابلیت شارژ شناور، امکانپذیر نیست.

جدول (۱): پارامترهای خودروهای برقی

پارامتر	تابع توزیع احتمال	مقدار متوسط	انحراف معیار	مقدار حداقل	مقدار حداکثر
ظرفیت (kWh)	یکنواخت	۱۸	۶/۹۳	۶	۳۰
زمان ورود (h)	نرمال قطع شده	۱۹	۲	۱۶	۱
زمان خروج (h)	نرمال قطع شده	۷	۲	۵	۱۲
شارژ اولیه (%)	نرمال قطع شده	۷۵	۲۵	۲۵	۹۵

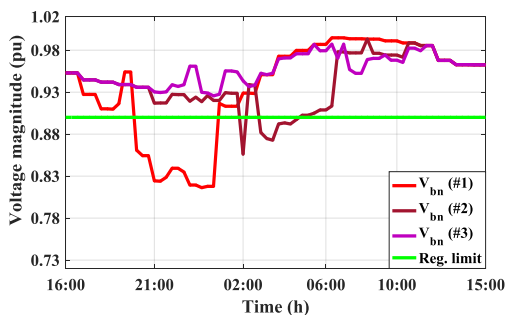
برای بررسی کارایی روش ارائه شده، سه روش مختلف شارژ خودروی برقی با یکدیگر مقایسه می‌شوند:

- روش اول: شارژ ناهماهنگ. در این روش، هر خودروی برقی به محض رسیدن به منزل، شروع به شارژ شدن می‌کند.
 - روش دوم: شارژ هماهنگ بدون قابلیت شارژ شناور خودروهای برقی. در این روش، شارژ خودروهای برقی بصورت هماهنگ انجام می‌شود و هر خودروی برقی تنها از فاز تامین کننده توان بار خانگی آن مشترک، می‌تواند شارژ شود. برای اعمال این روش کافی است در مدل ارائه شده، قید زیر اضافه شود:
- $$u_{i,PH,ph,t}^{Single\ PHEV,rv} = 0, \forall i \in B, PH \in P, ph \in P, PH \neq ph \quad (33)$$
- روش سوم: شارژ هماهنگ با قابلیت شارژ شناور خودروهای برقی که مدل آن در این مقاله ارائه شده است.

جدول (۲): محل قرارگیری خودروهای برقی در فیدر ۹ و نیز

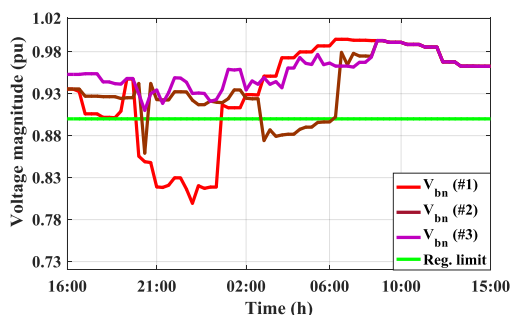
پارامترهای مختلف مربوط به آن‌ها (درصد نفوذ خودروی برقی ۴۰٪)

فاز/شین/فیدر	ظرفیت (kWh)	زمان ورود (h)	زمان خروج (h)	شارژ اولیه (%)
9-a-A	۲۶	۱۷:۰۰	۰۵:۳۰	۶۸
9-a-B	۱۹	۲۳:۱۵	۰۵:۰۰	۶۵
9-c-B	۱۷	۱۹:۰۰	۰۶:۱۵	۴۲
9-c-C	۹	۱۸:۴۵	۰۵:۴۵	۷۰
9-d-A	۲۹	۲۱:۰۰	۰۵:۳۰	۶۴
9-d-C	۲۵	۲۰:۰۰	۱۱:۴۵	۶۰
9-e-A	۲۶	۱۸:۱۵	۰۸:۰۰	۳۱
9-e-C	۸	۲۰:۴۵	۰۹:۱۵	۴۹
9-g-A	۱۶	۱۹:۳۰	۰۵:۴۵	۴۸
9-g-C	۱۰	۱۸:۴۵	۱۰:۱۵	۲۵
9-h-B	۹	۱۸:۰۰	۰۹:۰۰	۴۹



شکل (۱۰): تغییرات اندازه ولتاژ شین شماره 14-h (درصد نفوذ خودروی برقی ۴۰٪)

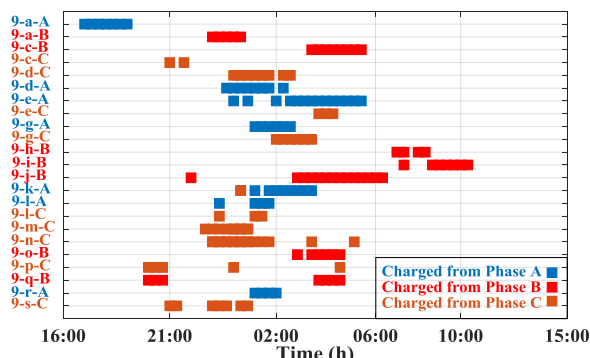
هر چه میزان سطح نفوذ خودروهای برقی افزایش یابد، اهمیت کنترل زمان شارژ آن‌ها بیشتر می‌شود. برای مشاهده این موضوع، تغییرات اندازه ولتاژ مربوط به شین B - h - 14 به ازای روش‌های مختلف شارژ با سطح نفوذ ۶۰٪ خودروهای برقی در شکل (۱۱) نشان داده شده است.



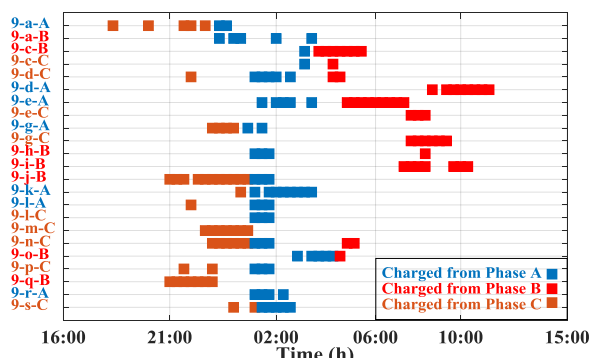
شکل (۱۱): تغییرات اندازه ولتاژ شین شماره 14-h (درصد نفوذ خودروی برقی ۶۰٪)

بار دیگر ملاحظه می‌شود که در روش شارژ ناهماهنگ (روش #1)، مقدار ولتاژ در برخی از ساعات شبانه روز از حداقل سطح ولتاژ قابل قبول کمتر می‌شود (از ساعت ۱۹:۰۰ الی ۱۹:۲۰ و ۲۰:۰۰ الی ۲۰:۲۰). همچنین در روش شارژ هماهنگ بدون قابلیت شارژ شناور خودروهای برقی (روش #2) نیز، مقدار سطح ولتاژ در برخی از ساعات شبانه روز از مقدار قابل قبول کمتر می‌شود (و از ساعت ۲۰:۰۰ الی ۲۰:۲۰ و ۰۳:۰۰ الی ۰۶:۴۰ به ازای درصد نفوذ ۶۰٪). با اینحال، استفاده از روش #3 باعث می‌شود که مقدار ولتاژ شین‌ها در هیچ یک از ساعات شبانه‌روز از مقدار حداقل قابل قبول کمتر نشود.

برای مشاهده میزان اثربخشی روش ارائه شده در بهبود پارامترهای شبکه توزیع، علاوه بر مقدار ولتاژ، دو پارامتر اندازه ولتاژ نول و نیز مقدار انرژی تلف شده سیستم به ازای سه روش مختلف شارژ خودروهای برقی با فرض درصد نفوذ برابر با ۶۰٪، در جدول (۳) با یکدیگر مقایسه شده است.



شکل (۸): نحوه شارژ خودروهای برقی واقع در شین‌های مختلف فیدر شماره ۹ با استفاده از روش دوم (درصد نفوذ خودروی برقی ۴۰٪)



شکل (۹): نحوه شارژ خودروهای برقی واقع در شین‌های مختلف فیدر شماره ۹ با استفاده از روش سوم (درصد نفوذ خودروی برقی ۴۰٪)

برای مشاهده تاثیر روش ارائه شده بر اندازه ولتاژ فاز بعنوان یکی از پارامترهای مهم شبکه توزیع، تغییرات اندازه ولتاژ مربوط به بدترین شین شبکه، B - h - 14، با در نظر گرفتن روش‌های مختلف شارژ و به ازای سطح نفوذ ۴۰٪ خودروهای برقی در شکل (۱۰) نشان داده شده است. با توجه به شکل فوق، نتایج زیر حاصل می‌شود:

- در روش شارژ ناهماهنگ (روش #1)، مقدار ولتاژ فاز B در برخی از ساعات شبانه روز از حداقل سطح ولتاژ قابل قبول کمتر می‌شود (از ساعت ۱۹:۰۰ الی ۱۹:۲۰ و ۲۰:۰۰ الی ۲۰:۲۰).
- در روش شارژ هماهنگ بدون قابلیت شارژ شناور خودروهای برقی (روش #2)، شرایط نسبت به حالت شارژ ناهماهنگ بهتر شده است که دلیل آن ممانعت از شارژ خودروها بصورت همزمان است. در نتیجه، مقدار جریان شبکه بخصوص در ساعات پیک بار کاهش می‌یابد. با اینحال، مقدار سطح ولتاژ در برخی از ساعات شبانه روز از مقدار قابل قبول کمتر می‌شود (از ساعت ۰۱:۴۰ الی ۰۲:۰۰ و ۰۳:۰۰ الی ۰۵:۰۰).
- استفاده از روش #3 باعث می‌شود که مقدار ولتاژ شین‌ها در هیچ یک از ساعات شبانه‌روز از مقدار حداقل قابل قبول کمتر نشود. زیرا در این روش، امکان شارژ خودروهای برقی از کم‌بارترین فاز هر یک از شین‌ها وجود داشته و در نتیجه، قید مربوط به سطح ولتاژ شبکه در تمام ساعات شبانه روز برآورده می‌شود.

جدول (۳): مقایسه پارامترهای شبکه به ازای روش‌های مختلف شارژ با در نظر گرفتن سناریوی دوم (درصد نفوذ خودروی برقی ۶۰٪)

روش شارژ	مدت زمانی که $ V \leq V_{MIN}$	کمترین مقدار ولتاژ	مقدار انرژی تلف شده	بیشترین مقدار ولتاژ نول
#1	4h , 40 min	0.799 pu	3.43 MWh	0.086 pu
#2	4 h	0.859 pu	2.91 MWh	0.044 pu
#3	-	0.908 pu	2.73 MWh	0.040 pu

همانگونه که ملاحظه می‌شود، استفاده از روش ارائه شده باعث می‌شود که مقدار ولتاژ فاز همواره بالاتر از حداقل سطح ولتاژ قابل قبول باشد. این موضوع مهمی است که در دو روش دیگر برآورده نمی‌شود. همچنین، استفاده از روش ارائه شده باعث کاهش مقدار انرژی تلف شده و نیز اندازه ولتاژ نول در مقایسه با روش‌های دیگر می‌شود.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک روش بهینه برای شارژ کنترل شده خودروهای برقی در شبکه‌های هوشمند توزیع هوشمند بر مبنای شارژ شناور ارائه شده است. روش پیشنهادی، این امکان را برای هر خودروی برقی فراهم می‌آورد تا توان الکتریکی موردنیاز برای شارژ خود را در زمان‌های کم-باری و از طریق کم‌بارترین فاز موجود در شین دریافت نماید. برای بررسی کارایی مدل ارائه شده، از شبکه توزیع ۳۱ شینه IEEE بهبود یافته استفاده شده است. سطوح مختلفی از نفوذ خودروهای برقی در شبکه توزیع در نظر گرفته شده و روش ارائه شده با دو روش دیگر شارژ خودروهای برقی مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج بدست آمده، نشان می‌دهد که استفاده از روش ارائه شده، باعث برآورده شدن قید ولتاژ به ازای هر سطحی از نفوذ خودروهای برقی می‌شود. همچنین مشاهده شد که به ازای درصد نفوذ خودروی برقی برابر با ۶۰٪، استفاده از مدل ارائه شده، باعث کاهش مقدار تلفات به اندازه ۶/۲ درصد نسبت به روش شارژ هماهنگ بدون در نظر گرفتن روش شارژ شناور می‌شود.

مراجع

- [۱] زادسر، مسعود، حقی فام، محمودرضا، "تأثیر استراتژی مدیریت خودکار خروج و خودترمیمی بر قابلیت اطمینان شبکه‌های توزیع هوشمند تحت نفوذ منابع انرژی گسترده"، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد ۴۹، شماره ۴، ۱۶۴۹-۱۶۶۳، ۱۳۹۸.
- [۲] شجاعی برجویی، آذین، معلم، مهدی، منشی، محمدحسین، "مدیریت انرژی بهینه اجتماعی با حضور ذخیره‌سازها در شبکه هوشمند"، نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران، سال هفدهم، شماره دوم، ۱۳۳-۱۲۳، ۱۳۹۹.
- [۳] آزاد مهران، قاینی محسن، "تعیین مکان بهینه ایستگاه‌های شارژ سریع خودروی برقی با در نظر گرفتن امکان تبادل بین ناحیه‌ای (مалеه موردی شهر مشهد)"، نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران، سال نوزدهم، شماره اول، ۳۲۹-۳۱۹، ۱۴۰۱.
- [4] Shafiee, S., Fotuhi-Firuzabad, M., Rastegar, M., "Investigating the Impacts of Plug-in Hybrid Electric Vehicles on Power Distribution Systems", IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 4, pp. 1351-1360, 2013.
- [5] Divshali, P.H., Choi, B.J., "Electrical market management considering power system constraints in smart distribution grids", Energies, vol. 9, no. 6, p. 405, 2016.
- [6] Nguyen, V.L., Tran-Quoc, T., Bacha, S., Nguyen, B., "Charging strategies to minimize the peak load for an electric vehicle fleet", 40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON), pp. 3522-3528, Oct. 2014.
- [7] Masoum, A.S., Deilami, S., Abu-Siada, A., Masoum, M.A.S., "Fuzzy Approach for Online Coordination of Plug-In Electric Vehicle Charging in Smart Grid", IEEE Transactions on Sustainable Energy, vol. 6, pp. 1112-1121, 2015.
- [8] Zheng, Y., Jian, L., "Smart charging algorithm of electric vehicles considering dynamic charging priority", IEEE International Conference on Information and Automation (ICIA), pp. 555-560, Aug. 2016.
- [9] Jian, L., Zheng, Y., Shao, Z., "High efficient valley-filling strategy for centralized coordinated charging of large-scale electric vehicles", Applied Energy, vol. 186, pp. 46-55, 2017.
- [10] Zheng, Y., Shang, Y., Shao, Z., Jian, L., "A novel real-time scheduling strategy with near-linear complexity for integrating large-scale electric vehicles into smart grid", Applied Energy, vol. 217, pp. 1-13, 2018.
- [11] Salehi, J., Abdolahi, A., "Optimal scheduling of active distribution networks with penetration of PHEV considering congestion and air pollution using DR program", Sustainable Cities and Society, vol. 51, Article 101709, 2019.
- [12] Liu, Sh., Li, X., Ding, Y., Su, Q., Liu, Zh., "A kind of demand response approach for PHEVs charging in smart grid", Chinese Control And Decision Conference (CCDC), IEEE, pp. 2002-2007, 2020.
- [13] Fouladi, E., Baghaee, H.R., Bagheri, M., Gharehpetian, G.B., "Power management of microgrids including PHEVs based on maximum employment of renewable energy resources", IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 56, no. 5, pp. 5299-5307, 2020.
- [14] Kasani, V.S., Tiwari, D., Khalghani, M.R., Solanki, S.Kh., Solanki, J., "Optimal Coordinated Charging and Routing Scheme of Electric Vehicles in Distribution Grids: Real Grid Cases", Sustainable Cities and Society, Article 103081, 2021.
- [15] Li, H., Rezvani, A., Hu, J., Ohshima, K., "Optimal day-ahead scheduling of microgrid with hybrid electric vehicles using MSFLA algorithm considering control strategies", Sustainable Cities and Society, vol. 66, Article 102681, 2021.
- [16] Zheng, Y., Niu, S., Shang, Y., Shao, Z., Jian, L., "Integrating plug-in electric vehicles into power grids: A comprehensive review on power interaction mode, scheduling methodology and mathematical foundation", Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 112, pp. 424-439, 2019.
- [17] Das, H.S., Rahman, M.M, Li, S., Tan C.W., "Electric vehicles standards, charging infrastructure, and impact on grid integration: A technological review", Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 120, Article 109618, 2020.
- [18] Gönül, Ö., Duman, A.C., Güler, Ö., "Electric vehicles and charging infrastructure in Turkey: An overview", Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 143, Article 110913, 2021.

- [19] Franco, J.F., Rider, M.J., Romero, R., "A mixed-integer linear programming model for the electric vehicle charging coordination problem in unbalanced electrical distribution systems", IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 6, no. 5, pp. 2200-2210, 2015.
- [20] Kikhavani, M.R., Hajizadeh, A., Shahrinia, A., "Charging coordination and load balancing of plug-in electric vehicles in unbalanced low-voltage distribution systems", IET Generation, Transmission & Distribution, vol. 14, no. 3, pp. 389-399, 2019.
- [21] Helm, S., Hauer, I., Wolter, M., Wenge, C., Balischewski, S., Komarnicki, P., "Impact of unbalanced electric vehicle charging on low-voltage grids", IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT-Europe), IEEE, pp. 665-669, 2020.
- [22] Deilami, S., Masoum, A.S., Moses, P.S., Masoum, M.A.S., "Real-Time Coordination of plug-In electric vehicle charging in smart grids to minimize power losses and improve voltage profile", IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 2, no. 3, pp. 456-467, 2011.
- [23] Su, W., Chow, M.Y., "Evaluation on intelligent energy management system for PHEVs/PEVs using Monte Carlo method", 4th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT), IEEE, pp. 1675-1680, 2011.
- [24] Meena, N.K., Yang, J., Singh, P., "Backward/Forward Method for Three-phase Power Flow Calculation in Low Voltage Distribution Networks with EV Charging Points", 8th IEEE India International Conference on Power Electronics (IICPE), IEEE, pp. 1-6, 2018.
- [25] Moghaddam, S.Z., Akbari, T., "Network-constrained optimal bidding strategy of a plug-in electric vehicle aggregator: A stochastic/robust game theoretic approach. Energy", Energy, vol. 151, pp. 478-489, 2018.
- [26] Franco, J.F., Rider, M.J., Lavorato, M., Romero, R., "A mixed-integer LP model for the reconfiguration of radial electric distribution systems considering distributed generation", Electric Power Systems Research, vol. 97, pp. 51-60, 2013.